



椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的设计与试验

周海丽^{1a,1b}, 颜梦莹^{1a}, 薛洪彬^{1a}, 庄如月^{1a}, 余学富², 叶秉良^{1a,1b}

(1. 浙江理工大学, a. 机械工程学院; b. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;
2. 浙江常山铭锐机电有限公司, 浙江衢州 324200)

摘 要: 针对国内甘薯移栽机在移栽过程中难以兼顾水平和小穴口移栽农艺要求以及运动平稳性差等问题, 在研究甘薯水平和小穴口移栽农艺要求的基础上, 设计并制备一种椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构。根据运动传递关系对移栽机构进行运动学分析, 并构建椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的运动学模型。应用人机交互方法对移栽机构结构参数进行分析和优化, 并通过移栽机构虚拟样机进行仿真分析。研制甘薯移栽机构样机, 进行移栽性能测试试验。结果表明: 当作业转速为 45.00 r/min 时, 该移栽机构可实现甘薯苗的水平栽植作业, 栽植深度为 50.10 mm, 水平入土长度为 121.30 mm, 破土穴口宽度为 40.30 mm, 满足甘薯水平和小穴口移栽农艺要求; 机构测试轨迹显示该机构运行平稳, 表明该机构在机械化甘薯移栽作业中具有可行性。该研究可为甘薯移栽机移栽机构的研发提供一定的理论和试验依据。

关键词: 甘薯苗移栽机; 移栽机构; 椭圆齿轮行星轮系; 运动学分析; 移栽试验

中图分类号: S223.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2025) 01-0096-09

引文格式: 周海丽, 颜梦莹, 薛洪彬, 等. 椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的设计与试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(1): 96-104.

Reference Format: ZHOU Haili, YAN Mengying, XUE Hongbin, et al. Design and tests on the transplanting mechanism of planetary gear train with elliptical gears for sweet potatoes[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(1): 96-104.

Design and tests on the transplanting mechanism of planetary gear train with elliptical gears for sweet potatoes

ZHOU Haili^{1a,1b}, YAN Mengying^{1a}, XUE Hongbin^{1a}, ZHUANG Ruyue^{1a}, YU Xuefu², YE Bingliang^{1a,1b}

(1a. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University; 1b. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Planting Equipment Technology, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Changshan Mingrui Electromechanical Co., Ltd., Quzhou 324200, China)

Abstract: Aiming at the problems that it is difficult to take into account the agronomic requirements of horizontal and small hole transplanting as well as the poor stability of movement in the transplanting process of domestic sweet potato transplanter, a transplanting mechanism of planetary gear train with elliptical gears for sweet potatoes was designed and prepared based on the study of the agronomic requirements of sweet potatoes' horizontal and small hole transplanting. The structural parameters of the transplanting mechanism were analyzed and optimized by human-computer interaction method, and simulated by the virtual prototype of the transplanting mechanism. A prototype of sweet potato transplanting mechanism was developed and tested for transplanting performance. The test results showed that when the operating speed was 45.00 r/min, the transplanting mechanism could realize the horizontal planting of sweet potato seedlings, with a planting depth of 50.10 mm, a horizontal soil-entry length of 121.30 mm, and a soil-breaking hole of 40.30 mm, which met the agronomic requirements of the

收稿日期: 2024-04-22 网络出版日期: 2024-09-13

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LD24E050007); 国家自然科学基金项目(32201676, 32171899)

作者简介: 周海丽(1989—), 女, 山西临汾人, 讲师, 博士, 主要从事农业机械设计方面的研究。

通信作者: 叶秉良, E-mail: zist_ybl@zstu.edu.cn

horizontal and small-hole transplanting of sweet potatoes. The test track of the mechanism showed that the mechanism operated smoothly, which indicated that the mechanism was feasible in the mechanized sweet potato transplanting operation. This study can provide certain theoretical and experimental basis for the research and development of transplanting mechanisms of sweet potato transplanting machines.

Key words: sweet potato seedling transplanter; transplanting mechanism; planetary gear train with elliptical gears; kinematics analysis; transplanting experiment

0 引 言

甘薯不仅是中国主要的粮食作物,也是具有显著优势的能源和药用作物,具有很高的经济价值、营养价值和药用价值^[1-2]。据联合国粮农组织(FAO)的统计数据显示,中国甘薯种植面积和总产量分别占世界的 29.8%和 55.6%^[3],是世界第一甘薯生产大国。然而,中国甘薯生产的综合机械化水平不高,尤其是占生产过程四分之一左右的移栽环节,长期以来使用人力,不仅劳动强度大,效率低,还难以保证作业质量。因此,研发符合中国甘薯移栽农艺要求的甘薯移栽机具有重要的现实意义^[4-6]。

移栽机构是甘薯移栽机的核心机构,国内外根据甘薯种植的实际环境,开展了许多甘薯移栽机及移栽机构的研发工作,实现了甘薯直栽、斜栽、水平栽、船底栽等栽植作业^[7-11]。欧美移栽机设计以大型化为主,广泛使用链夹式甘薯移栽机,利用链夹的夹紧和张开来实现甘薯苗斜栽,一次可栽植十多株甘薯苗,移栽效率高,但破土穴口较大^[12-13]。日本移栽机设计以小型化为主,所研制的甘薯移栽机利用曲柄摇杆机构实现斜栽和水平栽,作业时将甘薯苗放在夹苗带上,通过夹苗带旋转为栽苗机构提供秧苗,破土穴口小,适用于膜上移栽,机械化程度高,但价格昂贵,且不适用于中国甘薯栽植方式。中国甘薯移栽机研发起步晚,在设计上以蔬菜移栽机改造的通用移栽机为主^[14-15]。吴彦强等^[16]设计了 2ZLF-2 甘薯苗复式移栽机,采用柔性链夹式移栽装置实现直栽和斜栽,效率可达每行 40 株/min。吴旋等^[17]设计了甘薯盘夹式移栽机,可实现斜栽,还能够实现起垄、移栽、修垄一体化作业。何宇凡等^[18]研制了一款挠性圆盘式甘薯苗移栽装置,可实现水平栽。然而,上述移栽机构研究较少关注破土穴口,设计的移栽机对小穴口移栽的适用性差。朱斌彬等^[19-20]设计了一种适用于斜栽的带夹式甘薯移栽机,采用四杆机构的主动连杆驱动甘薯移栽臂实现间歇性往复摆动,并通过正交实验研究了插秧株距、行走速度和插秧装置离地高度等因素对插秧入土角和破膜口的影响,得到了最优移栽参数,所设计

机构破土穴口小,适用于膜上移栽。张涛等^[21]设计了一种适用于船底栽的四杆式甘薯苗移栽装置,开展了运动学优化设计,并基于 EDEM-ADAMS 联合仿真研究了移栽过程中夹苗爪-苗-土壤三者的互作机理,该四杆式移栽机构仿形能力强,但破土穴口较大,且运动平稳性差,效能提升潜力不足。此外,在各类栽植方法中,甘薯水平栽法相较于直栽、斜栽和船底栽,具有可结薯的节位更多的优点,有利于提高甘薯的产量^[22-25]。然而,目前实际生产中仍缺乏满足甘薯水平、小穴口平稳栽植要求的适用机器。

本文在研究甘薯水平、小穴口移栽农艺要求的基础上,提出了一种椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构。开展了移栽机构的运动学建模,分析其运动特性;应用人机交互方法,分析了不同移栽机构的结构参数对移栽轨迹的影响,实现了移栽机构的优化设计,并通过虚拟仿真得到了移栽轨迹和速度曲线,对理论曲线和仿真曲线的比较和分析,以验证移栽机构运动学模型及优化设计结果的正确性;开展了甘薯移栽机构样机移栽性能试验,得到了移栽轨迹和破土穴口效果,以验证机构的应用可行性。本文设计的椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构,可以为甘薯移栽机的研发和实际应用提供一定的参考。

1 移栽机构设计要求与工作原理

1.1 设计要求

甘薯水平栽植农艺要求为:甘薯苗入土深度为 50.00 mm,入土水平距离为 120.00 mm,株距为 200.00 mm,且破土穴口尽量小。基于上述农艺要求,甘薯苗移栽机构在取苗、运苗、植苗、回程等工作过程中,其动轨迹、静轨迹设计要求如图 1 所示。

在移栽机构作业时,首先栽植臂上的夹苗爪在取苗点 L 处取苗,为保证可靠取苗,要求在 L 处栽植臂与甘薯苗的角度(取苗角)接近 90°。L—M 为运苗阶段,此阶段夹苗爪始终保持闭合状态且栽植臂运动速度逐渐增大,在接近入土点 M 处时速度趋于匀速,以确保甘薯苗被稳定地插入土壤中;为防止入土瞬间栽植臂与水平地面间的夹角(栽苗角)过大导致甘薯苗不能平滑入土造成伤苗,要求 M 处栽苗

角为 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。M—N 为植苗阶段,此阶段栽植臂的运动速度逐渐减小,当夹苗爪运动到投苗点 N 处时,夹苗爪张开投苗。N—L 为回程阶段,该阶段为

空行程,夹苗爪一直处于张开状态,且栽植臂的运动速度逐渐增大,在接近取苗点时,运动速度逐渐减小,准备夹苗,进行下一次移栽作业。

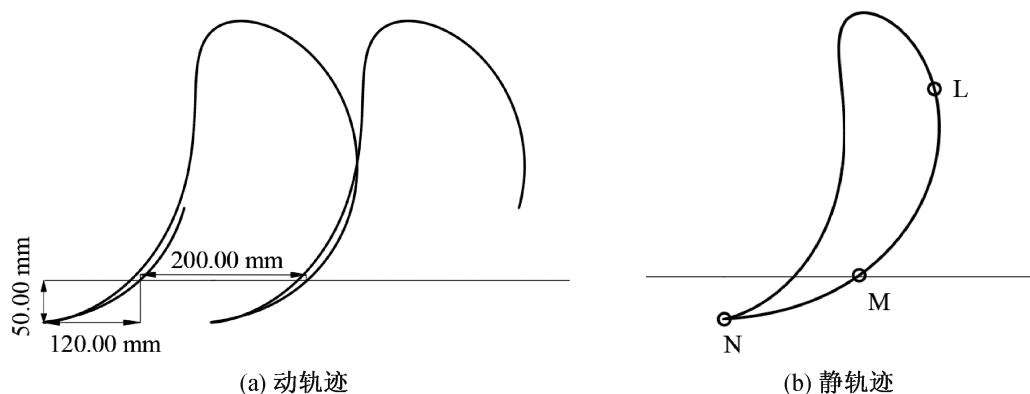
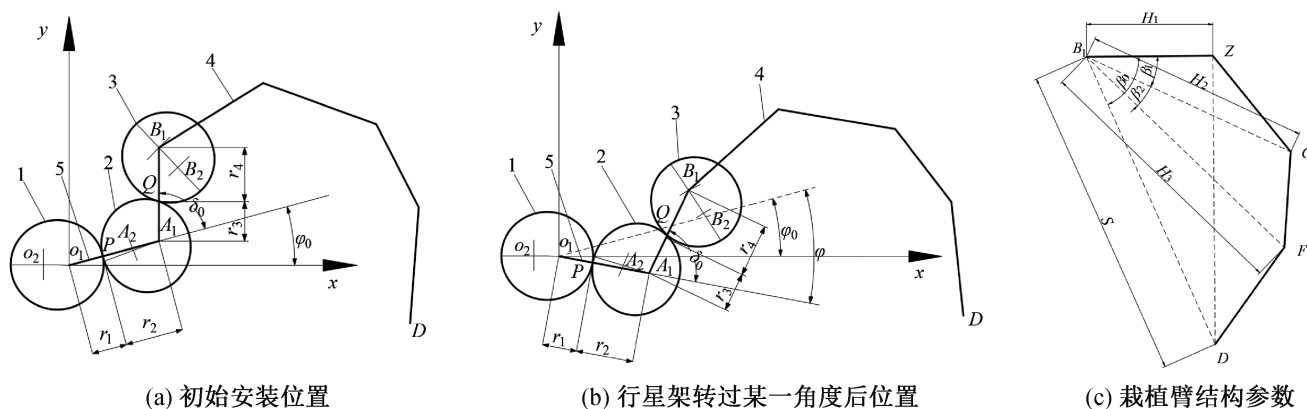


图 1 甘薯苗移栽轨迹要求示意图

1.2 工作原理

椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构由行星轮系和栽植臂两部分组成,如图 2 所示。行星轮系由太阳轮 1、中间轮 2、行星轮 3、齿轮箱 5(即行星架)等组成。3 个齿轮是完全相同的椭圆齿轮;太阳轮 1 通过凸台与牙嵌式法兰连接在齿轮箱上,中间轮 2 分别与太阳轮 1 和行星轮 3 相啮合。栽植臂 4 由栽植臂外壳、栽植臂凸轮、凸轮推杆、夹苗爪等组成;栽植臂壳体通过键与行星轴安装在一起,栽

植臂凸轮安装在齿轮箱上,凸轮推杆通过弹簧安装在栽植臂壳体上,夹苗爪通过旋转轴连接在栽植臂壳体上,且左右夹苗爪为完全对称结构。图 2 中: P 、 Q 分别为太阳轮与中间轮、中间轮与行星轮的啮合点, A_1 、 B_1 分别为中间轮和行星轮的旋转中心, D 为栽植臂夹苗爪尖点, S 为行星轮旋转中心到栽植臂端点 D 的距离; H_1 为 B_1Z 的长度, H_2 为 B_1G 的长度, H_3 为 B_1F 的长度, β_1 为 $\angle GB_1Z$, β_2 为 $\angle GB_1F$ 。



1. 太阳轮;2. 中间轮;3. 行星轮;4. 栽植臂;5. 行星架

图 2 椭圆齿轮行星轮系移栽机构简图

移栽机构在进行移栽作业时,太阳轮 1 的旋转中心轴转动,带动齿轮箱顺时针转动,进而使与太阳轮啮合的中间轮转动,再将动力传递到行星轮,动力通过行星轴输出,带动栽植臂一起转动。栽植臂一边随着齿轮箱作顺时针圆周运动,一边又与行星轮一起相对于行星架作逆时针变速运动,在两种运动的共同作用下,夹苗爪形成满足甘薯苗栽植要求的移栽轨迹和姿态。此外,栽植臂的推杆随着凸轮轮廓线的向径变化而作往复移动运动,进而控制夹苗爪的闭合与张开动作^[26-27]。

2 移栽机构运动学模型

以太阳轮的旋转中心 O_1 为坐标原点建立平面直角坐标系,取机构绕原点逆时针旋转的角度为正,反之为负^[28-29],建立的坐标系如图 2(a)所示。根据移栽机构运动传递关系^[30-31]建立椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构的运动学模型。

太阳轮与中间轮在点 P 啮合时,两齿轮节曲线向径 r_1 、 r_2 为:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{bk}{1 + \sqrt{1 - k^2 \cos \varphi}}, \varphi < 0, \\ r_2 = 2a - r_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: k 为椭圆短半轴与长半轴之比; φ 为某一时刻行星架转过的角位移, ($^\circ$); a 为椭圆长半轴, mm; b 为椭圆短半轴, mm。

中间轮与行星轮在点 Q 啮合时, 两齿轮节曲线向径 r_3 、 r_4 为:

$$\begin{cases} r_3 = \frac{bk}{1 + \sqrt{1 - k^2 \cos \varphi_{22}}}, \\ r_4 = 2a - r_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中: φ_{22} 为行星架 A_1B_1 相对中间轮长轴的角位移, ($^\circ$)。

点 A_1 的位移方程为:

$$\begin{cases} x_{A_1} = 2a \cos(\varphi_0 + \varphi), \\ y_{A_1} = 2a \sin(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

其中: φ_0 为行星架的初始安装角, ($^\circ$)。

点 B_1 的位移方程为:

$$\begin{cases} x_{B_1} = 2a \cos(\varphi_0 + \varphi) + 2a \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0), \\ y_{B_1} = 2a \sin(\varphi_0 + \varphi) + 2a \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中: δ_0 为行星架拐角, ($^\circ$)。

点 Z 的位移方程为:

$$\begin{cases} x_Z = x_{B_1} + H_1 \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0), \\ y_Z = y_{B_1} + H_1 \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0) \end{cases} \quad (5)$$

其中: α_0 为栽植臂对行星架的初始安装角, ($^\circ$); φ_{31} 为行星架 A_1B_1 相对行星轮长轴的角位移, ($^\circ$);

$$\beta_0 = \arctan\left(\frac{\sqrt{s^2 - H_1^2}}{H_1}\right)。$$

点 G 的位移方程为:

$$\begin{cases} x_G = x_{B_1} + H_2 \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0 - \beta_1), \\ y_G = y_{B_1} + H_2 \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0 - \beta_1) \end{cases} \quad (6)$$

点 F 的位移方程为:

$$\begin{cases} x_F = x_{B_1} + \\ \quad H_3 \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0 - \beta_1 - \beta_2), \\ y_F = y_{B_1} + \\ \quad H_3 \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31} + \beta_0 - \beta_1 - \beta_2) \end{cases} \quad (7)$$

点 D 的相对位移方程为:

$$\begin{cases} x_D = x_{B_1} + S \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31}), \\ y_D = y_{B_1} + S \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0 + \alpha_0 + \varphi_{31}) \end{cases} \quad (8)$$

其中: S 为行星轮轴心到栽植臂端点 D 的距离, mm。

点 D 的绝对位移方程为:

$$\begin{cases} x_{D_j} = x_D + \varphi H / 360, \\ y_{D_j} = y_D \end{cases} \quad (9)$$

其中: H 为甘薯苗移栽株距。

点 A_1 的速度方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{A_1} = -2a\dot{\varphi} \sin(\varphi_0 + \varphi), \\ \dot{y}_{A_1} = 2a\dot{\varphi} \cos(\varphi_0 + \varphi) \end{cases} \quad (10)$$

点 B_1 的速度方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{B_1} = -2a\dot{\varphi} \sin(\varphi_0 + \varphi) - 2a\dot{\varphi} \sin(\varphi_0 + \varphi + \delta_0), \\ \dot{y}_{B_1} = 2a\dot{\varphi} \cos(\varphi_0 + \varphi) + 2a\dot{\varphi} \cos(\varphi_0 + \varphi + \delta_0) \end{cases} \quad (11)$$

点 D 的相对运动速度方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_D = \dot{x}_{B_1} - S(\dot{\varphi}_{31} + \dot{\varphi}) \sin(\alpha_0 + \varphi_0 + \varphi_{31} + \varphi + \delta_0), \\ \dot{y}_D = \dot{y}_{B_1} + S(\dot{\varphi}_{31} + \dot{\varphi}) \cos(\alpha_0 + \varphi_0 + \varphi_{31} + \varphi + \delta_0) \end{cases} \quad (12)$$

点 D 的绝对运动速度方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{D_j} = \dot{x}_D + \dot{\varphi} H / 360, \\ \dot{y}_{D_j} = \dot{y}_D \end{cases} \quad (13)$$

3 移栽机构结构设计参数优化与仿真分析

根据移栽机构的设计要求和运动学模型, 确定移栽机构的优化目标 and 设计参数, 应用 Visual Basic 6.0 的可视化编程开发平台, 通过人机交互方式, 对移栽机构结构设计参数进行分析和优化。

3.1 优化目标与结构设计参数

为获得满足甘薯水平、小穴口移栽农艺要求的移栽轨迹, 根据移栽机构设计要求, 以及栽植臂在关键点的位置和姿态, 确定优化目标如下:

a) 移栽机构工作时, 栽植臂不与送苗装置发生干涉;

b) 栽植臂夹苗爪尖点运动到轨迹最低点时距地面深度约为 50.00 mm, 栽植臂夹苗爪尖点入土

点与轨迹最低点水平方向长度约为 120.00 mm,甘薯苗间的株距约为 200.00 mm;

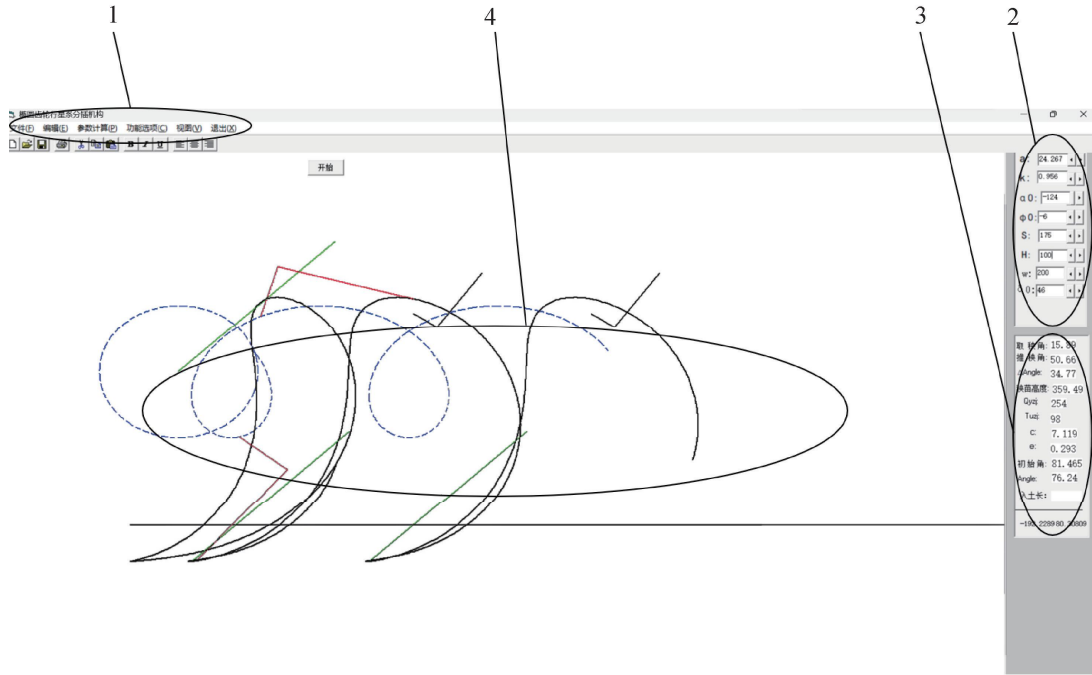
c)取苗角的理想区间为 $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$,栽苗角的理想区间为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$;

d)栽植臂夹苗爪所形成的穴口长度不超过 50.00 mm。

根据运动学模型,优化变量为:a)轮系参数及栽植臂安装尺寸参数,包括椭圆齿轮节曲线的长半轴

长度 a 、短半轴与长半轴之比 k 、行星架拐角 δ_0 、栽植臂相对于行星架的初始安装角 α_0 、行星轮旋转中心 B_1 到栽植臂夹苗爪尖点 D 的直线距离 S 、行星架的初始安装角 φ_0 ;b)栽植臂结构参数,包括行星轮旋转中心 B_1 到栽植臂点 Z 、 G 、 F 的距离 H_1 、 H_2 、 H_3 , B_1Z 与 B_1G 所形成的夹角 β_1 ,以及 B_1G 与 B_1F 所形成的夹角 β_2 等。

移栽机构参数优化平台主界面如图 3 所示。



1. 菜单栏;2. 数据输入区;3. 数据输出区;4. 图形结果显示区

图 3 移栽机构参数优化平台主界面

3.2 结构设计参数对移栽轨迹的影响分析

不同移栽机构参数值的运动轨迹示例如图 4 所

示,从图中可以看出,轮系参数及栽植臂安装尺寸参数会影响夹苗爪尖点的运动轨迹。

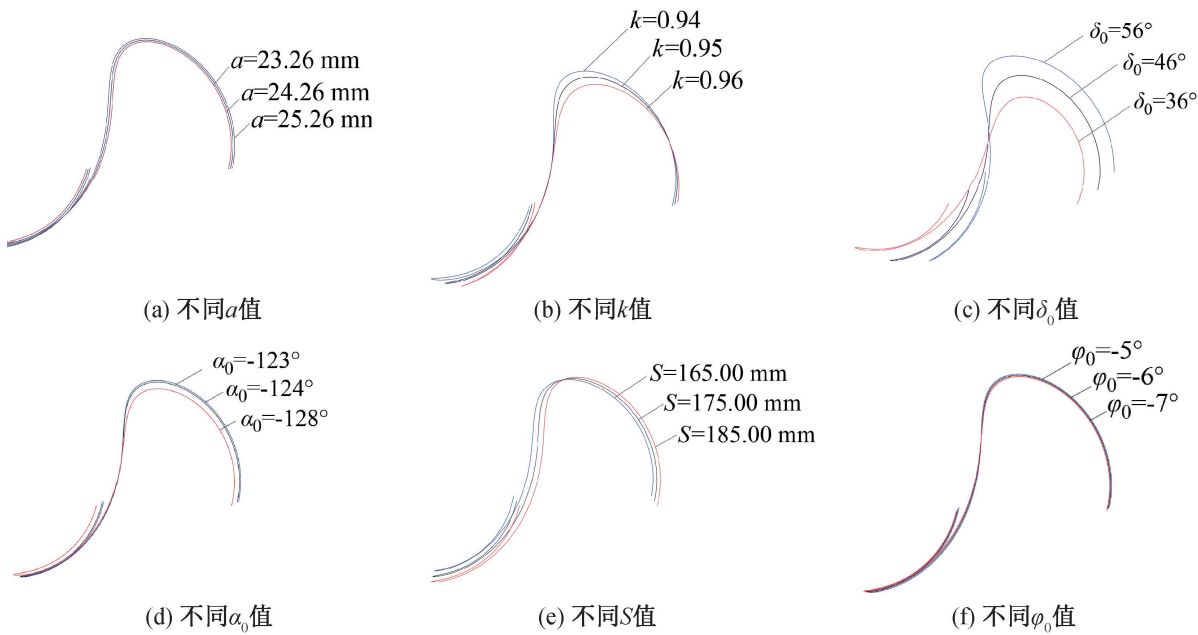


图 4 不同移栽机构参数值的理论运动轨迹示例

椭圆齿轮节曲线长半轴 a 对轨迹形状的影响如图 4(a)所示。当 a 增大时,轨迹的高度、宽度以及栽植深度均增大,对水平入土长度影响较小。

椭圆齿轮短半轴与长半轴之比 k 对轨迹形状的影响如图 4(b)所示。当 k 增大时,轨迹的高度减小,宽度逐渐增大,栽植深度增大,水平入土长度逐

渐减小。

行星架拐角参数 δ_0 对轨迹形状的影响如图 4(c)所示。当 δ_0 增大时,轨迹逆时针旋转,轨迹的宽度增大,栽苗角逐渐增大,水平入土长度逐渐减小,栽植深度逐渐增大。

栽植臂安装角 α_0 对轨迹形状的影响如图 4(d)所示。当 α_0 绝对值增大时,轨迹的高度、宽度以及栽植深度逐渐减小,水平入土长度逐渐增大。

行星轮轴心到栽植臂末端 D 的距离 S 对轨迹形状的影响如图 4(e)所示。当 S 增大时,轨迹的高度、水平入土长度以及栽植深度逐渐增大,对轨迹宽度的影响较小。

行星架初始安装角 φ_0 对轨迹形状的影响如图 4(f)所示。当 φ_0 绝对值增大时,轨迹的高度逐渐减小,整体轨迹逐渐向右倾斜,栽植深度逐渐减小,水平入土长度逐渐增大,对轨迹宽度的影响较小。

分析图 4 中各机构参数对移栽轨迹形状的影响发现:行星架拐角 δ_0 对轨迹形状的影响最大,椭圆齿轮短半轴与长半轴之比 k 、栽植臂安装角 α_0 、行星轮轴心到栽植臂末端 D 的距离 S 对轨迹形状的影响次之,椭圆齿轮节曲线长半轴 a 、行星架初始安装角 φ_0 对轨迹形状的影响最小。

栽植臂结构参数会影响夹苗爪的姿态,进而影响穴口大小。对栽植臂结构参数进行分析可知,当

H_1 为 57.00、60.00、75.00 mm 时,栽植臂运动形成的穴口长度分别为 55.00、44.00、48.00 mm,因此 H_1 的取值范围确定为 60.00~75.00 mm。人机交互优化后,当 $H_1=70.00$ mm 时,栽植臂运动形成的穴口长度最小,为 40.00 mm。当 H_1 确定后,在优化软件中调整 H_2 、 H_3 、 β_1 、 β_2 ,优选的 3 组数据及其所形成的穴口尺寸,如表 1 所示。由表 1 可知,在第 3 组结构参数下,栽植臂运动过程中形成的穴口长度最小。

表 1 不同栽植臂结构参数对应的穴口长度					
组数	H_2/mm	H_3/mm	$\beta_1/(\text{^\circ})$	$\beta_2/(\text{^\circ})$	穴口长度/mm
第 1 组	125.00	155.00	36	27	52.00
第 2 组	125.00	160.66	36	18	47.00
第 3 组	124.95	152.47	25	19	40.00

3.3 结构设计参数优化结果分析

根据前面的分析,得到一组较优的移栽机构结构参数: $a=24.26$ mm, $k=0.95$, $\alpha_0=-124^\circ$, $\varphi_0=-6^\circ$, $S=175.00$ mm, $\delta_0=46^\circ$; $H_1=70.00$ mm, $H_2=124.95$ mm, $H_3=152.47$ mm, $\beta_1=25^\circ$, $\beta_2=19^\circ$ 。在该组参数下,移栽机构的静轨迹和动轨迹分别如图 5 所示,移栽机构的轨迹参数为:入土深度为 50.00 mm,入土水平长度为 119.00 mm,移栽株距为 199.00 mm,取苗角为 87° ,栽苗角为 32° ,穴口长度为 40.00 mm,均满足优化设计要求。

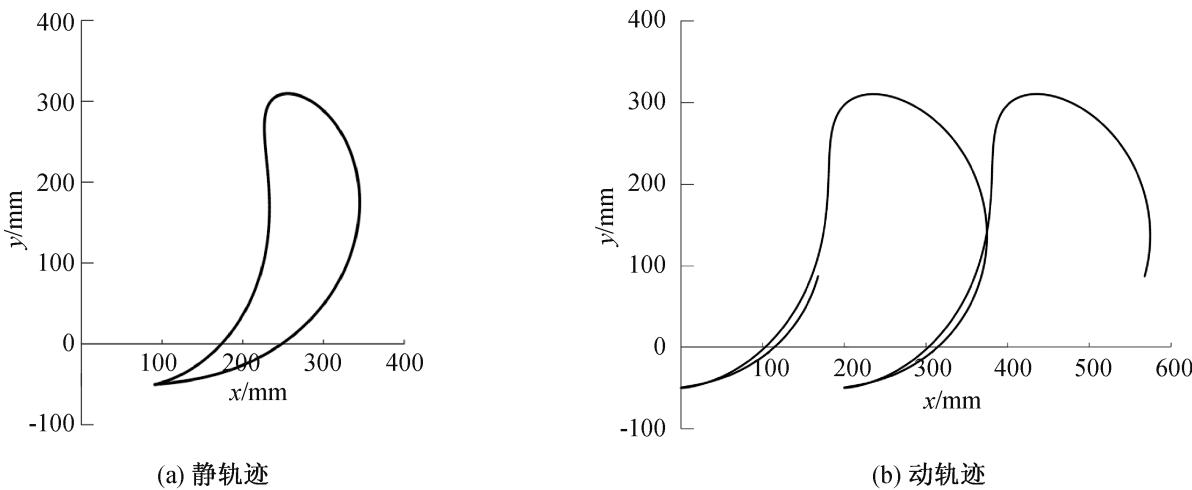


图 5 移栽机构的理论移栽轨迹

分析甘薯移栽机构栽植臂夹苗爪尖点在一个移栽周期(即行星架角位移为 $0^\circ\sim360^\circ$)内的速度特性,得到夹苗爪尖点的速度变化曲线,如图 6 所示。 $0^\circ\sim180^\circ$ 为运苗阶段,运动速度逐渐增大,至 35.00 mm/s 后,基本保持匀速运苗; $180^\circ\sim240^\circ$ 为植苗阶段,此阶段夹苗爪带苗入土,运动速度迅速减小,降至最低时,夹苗爪到达轨迹最低点,此时夹苗

爪张开投苗,该阶段速度的减小,有助于提高夹苗爪带苗移动的可靠性,并能防止甘薯苗在移栽机构回程时被拖出; $240^\circ\sim360^\circ$ 为回程阶段,运动速度迅速增大,行星架旋转至 300° 时,速度达到最大,随后速度逐渐减小,并在取苗点附近达到最小,这样有助于快速回程和在取苗点平稳取苗。这种速度特性可以在保证甘薯移栽质量的同时提高了移栽效率。

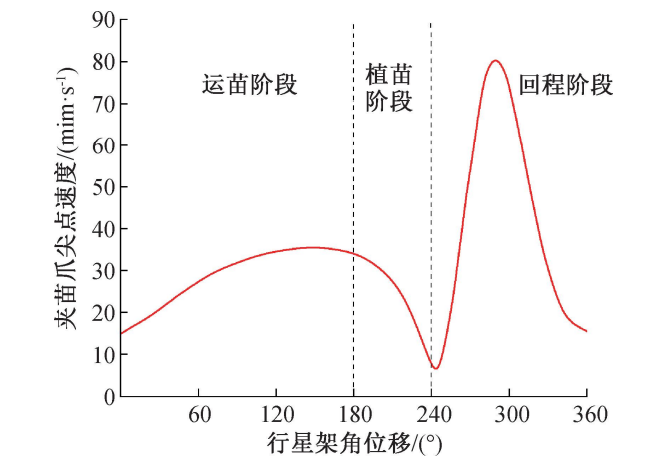


图 6 移栽机构栽植臂夹苗爪尖点的理论速度变化曲线

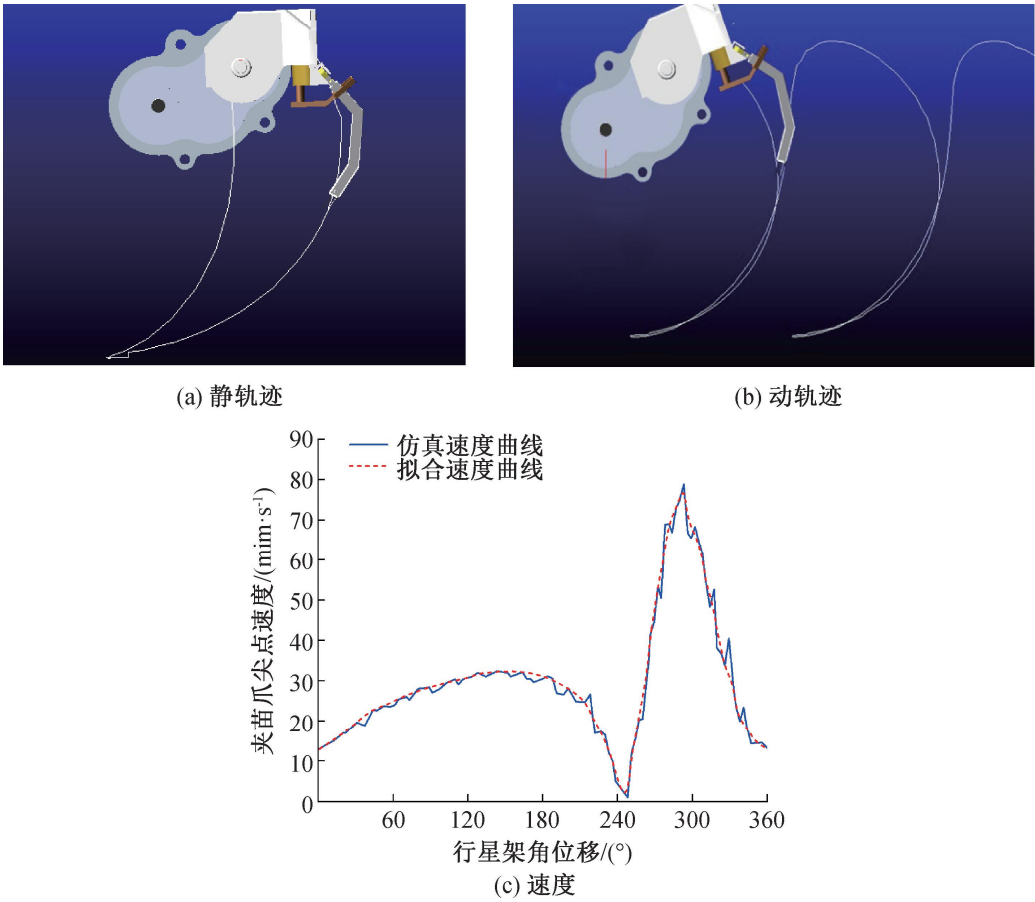


图 7 移栽机构的仿真移栽轨迹和栽植臂夹苗爪尖点的仿真速度变化曲线

4 样机移栽性能试验

为进一步验证移栽机构的应用可行性,研制了移栽机构物理样机,搭建了甘薯移栽试验台,照片如图 8(a)所示。试验选用的甘薯苗平均长度为 210.00

3.4 虚拟样机仿真分析

根据优化后的移栽机构结构参数,应用 SolidWorks 建立移栽机构三维模型,将模型导入 Adams 软件进行移栽机构的运动学仿真分析。仿真设定的机架转速为 5.00 r/min,水平方向速度为 16.70 mm/s,仿真得到栽植臂夹苗爪尖点的轨迹和速度曲线如图 7 所示。对比理论分析(图 5—图 6)和仿真(图 7)得到的运动轨迹和速度曲线,发现两者结果基本一致,表明移栽机构运动学模型和优化设计结果是正确的。

mm,茎秆平均直径为 4.50 mm。开展样机运动学试验,作业转速为 45.00 r/min 时,利用高速摄像机拍摄并分析得到栽植臂夹苗爪尖点的实际运动轨迹,如图 8(b)所示。由试验轨迹(图 8(b))、理论轨迹(图 5)、仿真轨迹(图 7)对比可知,三者的运动轨迹基本一致。

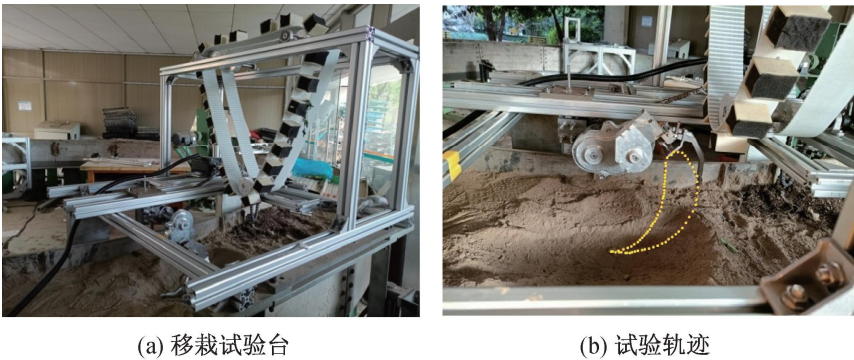


图 8 移栽机构样机照片

开展样机移栽试验,不同阶段的甘薯苗移栽试验照片如图 9 所示。经过多次移栽作业,测量甘薯茎秆的入土深度、水平长度以及破土穴口,得到平均栽植深度为 50.10 mm,平均水平长度为 121.30 mm,平均穴口长度为 40.30 mm,平均株距

为 198.00 mm,且试验过程移栽机构运动平稳。试验表明,本文设计的甘薯移栽机构能够很好地满足甘薯水平、小穴口移栽农艺要求,具有应用于甘薯移栽机的可行性。

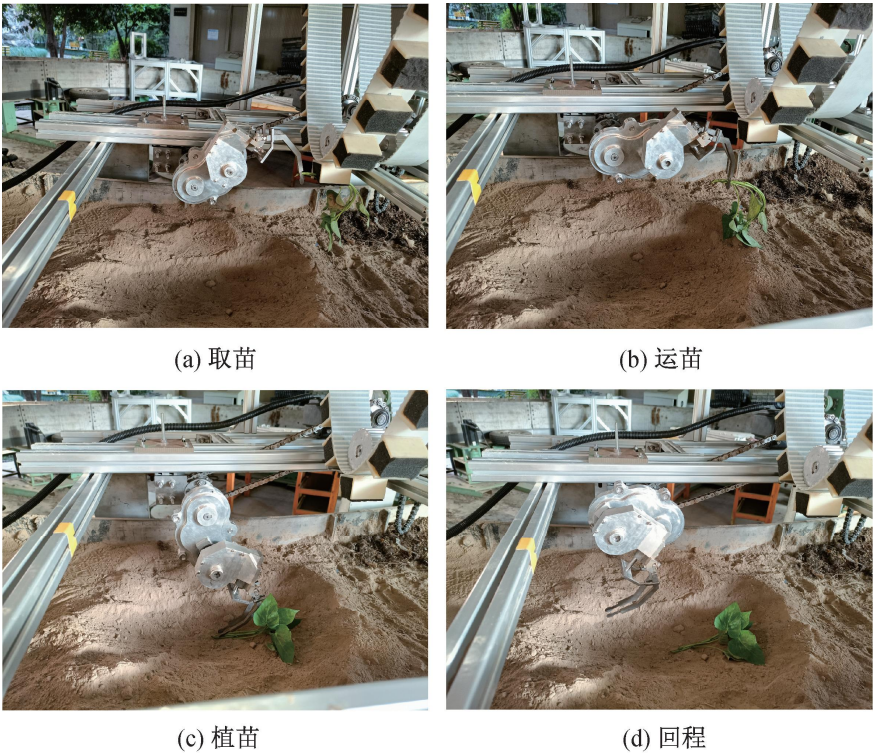


图 9 不同阶段的甘薯苗移栽试验照片

5 结 论

本文为实现甘薯水平、小穴口平稳栽植作业,基于甘薯水平、小穴口移栽农艺要求,提出了一种椭圆齿轮行星轮系甘薯移栽机构。对移栽机构进行了运动学建模与分析、参数优化、虚拟仿真和样机试验等,结果表明:当作业转速为 45.00 r/min 时,移栽机构可实现栽植深度为 50.10 mm、水平长度为 121.30 mm 的水平栽植轨迹和宽度为 40.30 mm 的破土穴口,可兼顾甘薯水平和小穴口移栽农艺要求;从高速摄像机采集的夹苗爪尖点的运动轨迹可以看出该移栽机运行平稳,这表明所提出的移栽机构具有应用于甘薯移栽机的可行性。本文为甘薯移栽机移栽机构的研发提供一定的理论和试验依据,有助于推动甘薯机械化移栽的进程。

参考文献:

[1] 王欣,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 483-492.

[2] Alam M K. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam): Revisiting the associated health benefits [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 512-

529.

[3] Food and Agriculture Organization of the United Station. FAOSTAT/data/Supply Utilization Accounts (2010-) [EB/OL]. (2024-04-22) [2023-10-27]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/SCL>.

[4] 张云鹏,谭芊,许鹏,等. 基于 EDEM-ADAMS 的甘薯水平移栽机构优化设计[J]. 中国农机化学报,2024,45(1):35-41.

[5] 武广伟,王瑞雪,李鑫,等. 国内外甘薯移栽技术装备研究现状及展望[J]. 农机化研究,2024,46(7):1-8.

[6] Li H, Wang B Q, Shi S, et al. Response of crop performance and yield of spring sweet potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam) as affected by mechanized transplanting properties[J]. Agronomy, 2023, 13(6): 1611.

[7] 穆桂脂,王千翼,郑德慧,等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2023,39(24):1-10.

[8] 那明君,滕乐,周振响,等. 全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):54-61.

[9] 李慧,何腾飞,刘虎,等. 丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制[J]. 农业工程学报,2023,39(16):26-35.

[10] Zhang W Z, Zhu Q, Ge D M, et al. Design and experiment of the side insertion horizontal transplanting device for sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) seedlings on mulch film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(6): 148-157.

[11] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2022,53(9):1-20.

- [12] 武广伟,安晓飞,颜丙新,等. 基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(S1):99-109.
- [13] Shao Y Y, Zhang H D, Xuan G T, et al. Simulation and experiment of a transplanting mechanism for sweet potato seedlings with ‘boat-bottom’ transplanting trajectory [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 96-101.
- [14] 张永政,曹成茂,秦宽,等. 线式供苗全自动甘薯移栽机设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2):28-36.
- [15] Liu Z D, Wang X, Zheng W X, et al. Design of a sweet potato transplanter based on a robot arm[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9349.
- [16] 吴彦强,宫增民,常广民,等. 2ZLF-2 甘薯裸苗复式移栽机设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程,2021,59(2):54-57.
- [17] 吴旋,申屠留芳,刘涵,等. 甘薯盘夹式移栽机设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(11):107-112.
- [18] 何宇凡,丛岳,颜丙新,等. 基于挠性圆盘的甘薯裸苗类水平栽植运动分析与试验[J]. 中国农业大学学报,2022,27(11):187-196.
- [19] 朱斌彬. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计与仿真[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017:13-15.
- [20] 朱斌彬,吕钊钦. 带夹式甘薯裸苗移栽机的设计[J]. 农机化研究,2018,40(6): 120-123.
- [21] 张涛. 基于“船底形”位姿的甘薯裸苗膜上移栽装置设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021:40-51.
- [22] 赵海,刘新鑫,潘志国,等. 甘薯种植农艺及机械化种植技术研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):21-26.
- [23] Li L, Xu Y L, Pan Z G, et al. Design and experiment of sweet potato up-film transplanting device with a boat-bottom posture [J]. Agriculture,2022,12(10):1716.
- [24] Yan W, Hu M J, Li K, et al. Design and experiment of horizontal transplanter for sweet potato seedlings [J]. Agriculture, 2022, 12(5): 675.
- [25] Woodard A J, Schultheis J R, Jennings K M, et al. Horizontal planting orientation can improve yield in organically grown sweetpotato[J]. HortScience, 2024, 59(1): 36-42.
- [26] Li G, Zhu W D. Design and power loss evaluation of a noncircular gear pair for an infinitely variable transmission[J]. Mechanism and Machine Theory,2021,156:104137.
- [27] Prikhodko A A. Design and investigation of intermittent motion planetary mechanisms with elliptical gears[J]. Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences,2019,14(6):354-368.
- [28] 吴国环,俞高红,周海丽,等. 三臂回转式水稻钵苗移栽机构反求设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):84-91.
- [29] 周海丽,杨伟,俞高红,等. 蔬菜钵苗移栽机开沟式多杆植苗机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):79-86.
- [30] Yu Y X, Liu J K, Ye B L, et al. Design and experimental research on seedling pick-up mechanism of planetary gear train with combined non-circular gear transmission [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 49.
- [31] 周海丽,刘建刚,俞高红,等. 蔬菜移栽机斜齿轮-非圆齿轮行星轮系取苗机构研究[J]. 农业机械学报,2023,54(8):77-86.

(责任编辑:康 锋)